

51

Int. Cl.:

F 01 d, 5/12

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT



52

Deutsche Kl.:

14 c, 5/12

10

11

21

22

43

# Offenlegungsschrift 2 144 600

Aktenzeichen: P 21 44 600.4

Anmeldetag: 7. September 1971

Offenlegungstag: 15. März 1973

Ausstellungspriorität: —

30

Unionspriorität

32

Datum: —

33

Land: —

31

Aktenzeichen: —

54

Bezeichnung: Verwundene und verjüngte Laufschaufel für axiale Turbomaschinen

61

Zusatz zu: —

62

Ausscheidung aus: —

71

Anmelder: Anm: Ziegler, Gustav, 4600 Dortmund

Vertreter gem. § 16 PatG: —

72

Als Erfinder benannt: Ziegler, Gustav, Dipl.-Ing., 8900 Augsburg

56

Rechercheantrag gemäß § 28 a PatG ist gestellt

Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:

GB-PS 768 026

FR-OS 2 014 127

geändertes Pat.-Bl. v. 6.5.76

DT 2144600

2144600

Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg Aktiengesellschaft

89 Augsburg, Stadtbachstraße 1

P. B. 2631 / 1048

Augsburg, den 6. September 1971

Verwundene und verjüngte Laufschaufel für  
axiale Turbomaschinen

Die Erfindung betrifft eine verwundene Laufschaufel für axial durchströmte Turbomaschinen mit zum Kopfprofil hin kontinuierlich abnehmenden Querschnittsflächen.

In den Querschnitten einer verwundenen Laufschaufel werden unter dem Einfluß der Fliehkraft Torsionsmomente wirksam. Diese führen namentlich in Bereichen dünner, stark verwundener Profile ( $d/l < 0,17$ ), wie sie beispielsweise Turbinenschaufeln für Turbolader, Gasturbinen und Dampfturbinen-Endstufen, sowie Laufschaufeln der ersten Stufen von Axialverdichtern aufweisen, zu verhältnismäßig hohen Torsionsspannungen. In extremen Fällen erreichen diese den Wert der im betrachteten Querschnitt herrschenden, fliehkraftbedingten Zugspannung. Die aus Zugspannung und Torsionsspannung nach der Schubspannungshypothese ermittelte Vergleichsspannung beträgt dann das  $\sqrt{5}$ -fache der Zugspannung.

Somit tragen die fliehkraftbedingten Torsionsspannungen entscheidend

309811/0450

-/-

zur Verminderung der Lebensdauer der Laufschaufel bei, und zwar insbesondere dann, wenn das Laufschaufelblatt im radialen Bereich des Bruchsicherheits-Minimums stark verwunden ist und dort verhältnismäßig dünne Profile aufweist.

Im folgenden werden diese Zusammenhänge anhand eines hierzu geeigneten Rechnungsganges zur Ermittlung der Torsionsbeanspruchung des Schaufelblattes näher erläutert: Zur Berechnung des fliehkraftbedingten Torsionsmomentes  $M_x$ , das einen am Radius  $r_x$  liegenden Profilschnitt  $X$  beansprucht, zerlegt man zweckmäßig die radial gerichteten Fliehkräfte der Massenteilchen in Komponenten, die parallel (Index 2) bzw. senkrecht (Index 1) zur radial stehenden Schwerachse des Schaufelblattes gerichtet sind.

Aus letzteren resultieren Torsionsmomente  $M_1$ , die auch bei der unverwundenen Laufschaufel vorhanden sind und ein Zudrehen des Gitters bewirken:

$$M_{1x} = \int \omega^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_{r_x}^{r_a} \sin 2\varphi \cdot (J_{\max} - J_{\min}) \cdot dr$$

$J_{\max}$  bzw.  $J_{\min}$  bezeichnen die Hauptträgheitsmomente der einzelnen Profilflächen;  $\varphi$  den spitzen Winkel zwischen der  $J_{\min}$ -Hauptträgheitsachse und der Umfangsrichtung;  $\rho$  die Dichte des Schaufelwerkstoffes und  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit. Das Integral erstreckt sich über den radial außerhalb von  $X$  liegenden Teil des Schaufelblattes.

Die parallel zur Schwerachse gerichteten Fliehkraftkomponenten der

-/-

309811/0450

Massenteilchen des radial außerhalb von X liegenden Schaufelteiles können auf den betrachteten Querschnitt X kein Torsionsmoment ausüben. Bei der unverwundenen Schaufel ist auch tatsächlich  $M_2 = 0$ . Ist dagegen das Schaufelblatt im Bereich des betrachteten Querschnitts X verwunden, dann schließen die in den Fasern dieses Schaufelteiles zu übertragenden Längskräfte mit den im Querschnitt X herrschenden Zugkräften  $\sigma_{zx} \cdot df_x$  kleine Winkel  $\varphi_x$  ein. Demzufolge treten in der Profilebene X liegende Kräfte (sogenannte "primäre Schubspannungen") von der Größe  $\sigma_{zx} \cdot df_x \cdot \tan \varphi_x$  auf. Das aus diesen resultierende Torsionsmoment  $M_{2X}$  erhält man beispielsweise aus der Näherungsformel:

$$M_{2X} = \sigma_{zx} \cdot \left( \frac{\Delta \varphi}{\Delta r} \right)_X \cdot (J_{\max})_X$$

$\left( \frac{\Delta \varphi}{\Delta r} \right)_X \approx \left( \frac{\Delta \beta_s}{\Delta r} \right)_X$  kennzeichnet die örtliche Verwindung an der Stelle  $r_x$  ( $\beta_s$  bezeichnet den örtlichen Staffelungswinkel). Die Momente  $M_2$  bewirken ein Aufdrehen des Gitters. Sie sind bei stark verwundenen Schaufeln um ein Vielfaches größer als die Momente  $M_1$ . Unter Fliehkrafteinfluß verringert sich demnach die Verwindung des Schaufelblattes. Die Verdrillung erfolgt um die Verbindungslinie der Schubmittelpunkte.

Es ist bemerkenswert, daß das Teilmoment  $M_1$  - ausgehend vom Schaufelkopf, wo es Null ist - zum Schaufelfuß hin kontinuierlich zunimmt. Das Teilmoment  $M_2$  ist dagegen nur von der örtlichen Verwindung abhängig. Der radial außerhalb des betrachteten Querschnittes X liegende Schaufelteil geht in die Rechnung zur Ermittlung von  $M_{2X}$  nur insoweit ein, als er die Größe der im Blattquerschnitt X

-/-

herrschenden Zugspannung  $\sigma_{zx}$  bestimmt. Wird der Querschnitt X durch eine Bohrung geschwächt, so hat dies auf  $M_{1X}$  keinen wesentlichen Einfluß.  $M_{2X}$  wird dagegen mit  $\sigma_{zx}$  größer.

Außer den fliehkraftbedingten Torsionsmomenten  $M_1$  und  $M_2$  treten noch weitere Torsionsmomente  $M_3$  auf, die durch die Strömungskräfte hervorgerufen werden. Zu ihrer Berechnung ist die Kenntnis der Druckverteilungen und der Schubmittelpunkte der Profile erforderlich. Ihr Drehsinn ist von Fall zu Fall verschieden. Sie sind jedoch im allgemeinen vernachlässigbar klein.

Die im Querschnitt X auftretenden Schubspannungen werden durch die gleichzeitige Belastung durch diese drei Momente hervorgerufen.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Laufschaufel der eingangs bezeichneten Art so auszubilden, daß ihre Bruchsicherheit vergrößert wird, ohne dabei ihre strömungstechnische Qualität spürbar zu beeinträchtigen.

Erfindungsgemäß gelingt die Lösung dieser Aufgabe dadurch, daß im radialen Bereich minimaler Bruchsicherheit eine gegenüber den angrenzenden radialen Bereichen verminderte Verwindung und verminderte Änderung der Profilwölbung vorgesehen ist. Dadurch werden im gefährdeten radialen Bereich die aus den fliehkraftbedingten Torsionsmomenten resultierenden Schubspannungen zumindest soweit vermindert, daß sie keinen wesentlichen Einfluß auf die Bruchsicherheit der Laufschaufel mehr haben. Diesen Zusammenhängen wurde bisher keine ausreichende Beachtung geschenkt oder aber es wurden schwerwiegende strömungstechnische Nachteile befürchtet.

-/-

Strömungstechnische Nachteile, die sich bei Anwendung der Erfindung aus der Abweichung der Schaufelform von der nach strömungstechnischen Gesichtspunkten idealen Form ergeben, können praktisch vollständig dadurch vermieden werden, daß der radiale Verlauf der abströmseitigen Profilskelettwinkel zumindest angenähert entsprechend den strömungstechnischen Erfordernissen aufrechterhalten ist. Die Einhaltung des strömungstechnisch richtigen Abströmwinkelverlaufs ist wegen seines verhältnismäßig großen Einflusses auf den Wirkungsgrad von besonderer Bedeutung. Demgegenüber ist eine exakte Anpassung der eintrittseitigen Profilskelettwinkel an die Zuströmrichtung der Relativströmung nicht notwendig, weil insbesondere Turbinenprofile gegen diesbezügliche Abweichungen in verhältnismäßig weiten Grenzen unempfindlich sind. Die bei Anwendung der Erfindung sich ergebende Abweichung der eintrittseitigen Profilskelettwinkel vom strömungstechnisch optimalen Verlauf bleibt innerhalb dieses Unempfindlichkeitsbereiches der Profile. Darüber hinaus bietet die in gewissen Grenzen freie Wahl der Wölbungsrücklage eine, wenn auch begrenzte Möglichkeit, ohne Einflußnahme auf die Verwindung, die strömungstechnischen Eintrittsverhältnisse weiter zu verbessern.

Somit ergeben sich insbesondere bei Einhaltung des strömungstechnisch optimalen Abströmwinkelverlaufes durch die Anwendung der Erfindung keine nennenswerten zusätzlichen Strömungsverluste. In diesem Zusammenhang ist noch zu bemerken, daß die strömungstechnische Optimierung einer erfindungsgemäß ausgebildeten Laufschaufel es mit sich bringt, daß im Vergleich zu einer nur nach strömungstechnischen Gesichtspunkten kontinuierlich verwundenen Laufschaufel die bereichsweise gegebenenfalls stark verminderte Verwindung durch eine entsprechend erhöhte Verwindung in angrenzenden Bereichen kompensiert ist.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachstehenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung. Es zeigt

- Figur 1                    eine Laufschaufel einer Flugtriebwerksturbine ohne Anwendung der Erfindung,
- Figur 2                    in etwas vergrößerter Darstellung eine Ansicht der Laufschaufel nach Figur 1 von oben mit einer Darstellung der senkrecht zur Schwerlinie S geführten Profilschnitte,
- Figur 3                    eine Laufschaufel entsprechend Figur 1 mit den Merkmalen der Erfindung,
- Figur 4                    eine zu Figur 3 gehörige Darstellung entsprechend Figur 2,
- Figuren 5 und 6          den radialen Verlauf einiger Kenngrößen einer beispielsweise Laufschaufel für die erste Stufe einer Flugtriebwerksturbine,
- Figuren 7 und 8          eine den Figuren 5 und 6 entsprechende Darstellung für eine Laufschaufel mit Dämpfungsdraht, beispielsweise für Turbolader.

-/-

309811/0450

Bei der in Figur 1 dargestellten Laufschaufel herkömmlicher Art handelt es sich um die Laufschaufel einer Flugtriebwerksturbine. Sie ist vom Fußschnitt 1 bis zum Kopfschnitt 7 ziemlich gleichmäßig verwunden und zwischen dem Fußschnitt 1 und dem Kopfschnitt 7 zur Verdeutlichung in mehrere Profilschnitte 2 bis 6 unterteilt. Die zugehörige Darstellung in Figur 2 zeigt deutlich die ziemlich gleichmäßige Änderung der Staffelungswinkel  $\beta_f$  und der Profilwölbung.

In den Figuren 3 und 4 ist eine entsprechende Laufschaufel bei Anwendung der Erfindung dargestellt. Diese Laufschaufel ist in den Profilschnitten 1 bis 7 entsprechende Profilschnitte 8 bis 14 eingeteilt, der Bereich minimaler Bruchsicherheit möge aufgrund des von der Brennkammer angebotenen radialen Temperaturprofiles etwa im radial mittleren Bereich der Laufschaufel liegen. Aus den Darstellungen in den Figuren 3 und 4 ist klar erkennbar, daß in diesem Bereich minimaler Bruchsicherheit eine gegenüber den angrenzenden radialen Bereichen stark verminderte Verwindung und stark verminderte Änderung der Profilwölbung vorgesehen ist. Dabei ist der radiale Verlauf der Abströmwinkel praktisch beibehalten, so daß sich wesentliche Abweichungen von der strömungstechnisch idealen Form nach den Figuren 1 und 2 lediglich im Bereich des Strömungseintritts ergeben, wo der Einfluß dieser Abweichungen auf den Wirkungsgrad der Laufschaufel von nur untergeordneter Bedeutung ist.

Die Darstellungen in den Figuren 5 und 6 zeigen die Verhältnisse bei Anwendung der Erfindung auf die Laufschaufel der ersten Turbinenstufe eines Flugtriebwerks; Fig. 7 und 8 bei Anwendung der Erfindung auf eine Turbinenschaufel mit Dämpfungsdraht für Turbolader. Die

-/-

309811/0450



Verhältnisse ohne Anwendung der Erfindung sind dabei grundsätzlich durch gestrichelte, bei Anwendung der Erfindung hingegen durch ausgezogene Linien dargestellt.

In Figur 5 ist bei 15 bzw. 16 der radiale Verlauf der fliehkraftbedingten Zugspannungen im Schaufelblatt aufgetragen, auf welchen die Erfindung, wie durch die Lage der Kurven 15 und 16 zueinander erkennbar wird, keinen Einfluß hat. Bei 17 bzw. 18 ist - ohne bzw. bei Anwendung der Erfindung - der jeweilige Verlauf der aus Zugspannung und Torsionsspannung gebildeten Vergleichsspannung wiedergegeben. Der strichpunktierte Linienzug 19 stellt den radialen Verlauf der Zeitstandfestigkeit  $\sigma_{B300h}$  dar. Er entspricht einem für die erste Stufe einer Flugtriebwerksturbine typischen radialen Verlauf der Laufschaufeltemperatur bei Vollast. Die Sicherheit gegen Bruch nach 300 Vollaststunden ist also durch den Abstand der Linienzüge 17 bzw. 18 vom Linienzug 19 gegeben. Man erkennt, daß im gezeigten Beispiel die Festigkeit der Laufschaufel ohne Anwendung der Erfindung nach 300 Vollaststunden erschöpft ist und daß durch die Anwendung der Erfindung die Lebensdauer der Laufschaufel beträchtlich erhöht ist.

In der Figur 6 ist bei 24 bzw. 25 der radiale Verlauf der abströmseitigen Profilskelettwinkel und bei 26 bzw. 27 der radiale Verlauf der Staffelungswinkel vom Schaufelfuß bis zum Schaufelkopf hin ohne bzw. bei Anwendung der Erfindung aufgetragen. Die Darstellung zeigt, wie das Laufschaufelblatt erfindungsgemäß verwunden werden muß, um den festigkeitsmäßig günstigen Verlauf der Vergleichsspannung nach Linienzug 18 in Figur 5 zu erhalten. In dem zwischen den Punkten 20 und 21 gelegenen Bereich minimaler Bruchsisicherheit verläuft die Kurve 27 für den Verlauf der Staffelungswinkel bei Anwendung der Er-

-/-

309811/0450

findung im wesentlichen parallel zur Kurve 25 für den Verlauf der abströmseitigen Prüfskelettwinkel. Das Schaufelblatt ist also in diesem Bereich nur soweit verwunden, wie es bei annähernd gleichbleibender Profilwölbung zur Aufrechterhaltung des strömungstechnisch optimalen Abströmwinkelverlaufes notwendig ist, d. h. es weist in diesem Bereich bei annähernd konstanter Profilwölbung eine nur geringfügige Verwindung auf. In den zwischen den Punkten 20 und 22 bzw. 21 und 23 liegenden Übergangszonen nimmt die Verwindung und gleichzeitig die Änderung der Profilwölbung kontinuierlich zu. In den angrenzenden Bereichen zwischen Punkt 22 und dem Schaufelfuß bzw. Punkt 23 und dem Schaufelkopf ist die Verwindung und Änderung der Profilwölbung im Vergleich zur Schaufel ohne Anwendung der Erfindung größer. Wie aus Figur 5 hervorgeht, ist die damit verbundene Erhöhung der Vergleichsspannung in dieser Zone für die Lebensdauer der Schaufel ohne Bedeutung.

Bei den analogen Darstellungen in Figur 7 und 8 ändern sich lediglich die Voraussetzungen für die Anwendung der Erfindung derart, daß der gefährdete Bereich minimaler Bruchsicherheit nicht wie bei einer in den Figuren 5 und 6 behandelten Laufschaufel für die Turbine eines Flugtriebwerks aufgrund des radialen Temperaturverlaufes am Brennkammeraustritt im mittleren Bereich der Laufschaufel liegt, sondern durch die Anbringung eines Dämpfungsdrahtes im Kopfbereich der Laufschaufel. Auch hier gelten die ausgezogenen Linien für die erfindungsgemäß ausgebildete Schaufel und die unterbrochenen Linien für die in konventioneller Weise nur nach strömungstechnischen Gesichtspunkten verwundene Schaufel.

Im weiten Betriebsdrehzahlbereich eines Turboladers sind Resonanzen der verschiedenen Eigenschwingungsformen des Schaufelblattes mit

Harmonischen oder Erregungsintensität unvermeidlich. Durch Anwendung eines Dämpfungsdrahtes wird im allgemeinen die Gefahr eines Schwingungsbruches stark vermindert. Mit der Dämpfungsdrahtbohrung kommt jedoch eine neue bruchgefährdete Stelle hinzu, da der Blattquerschnitt durch die Bohrung stark geschwächt wird. Gleichzeitig kommt im Bereich der Bohrung zur Zugspannung eine fliehkraftbedingte Biegespannung hinzu, weil der Schwerpunkt der nach dem Anbringen der Bohrung verbleibenden Restquerschnitte nicht mehr mit dem des Vollprofiles übereinstimmt. Im Gegensatz zu den von einer nicht radialen Lage der Schwerlinie herrührenden Biegespannungen werden diese nicht durch eine entsprechende Verformung des Blattes ausgeglichen; bleiben also während der ganzen Lebensdauer des Blattes bestehen. Bei der konventionell verwundenen Schaufel kommt zu den Zug- und Biegespannungen noch die verhältnismäßig große fliehkraftbedingte Schubspannung hinzu.

In Figur 7 ist bei 29 bzw. 30 wieder der radiale Verlauf der fliehkraftbedingten Zugspannung aufgetragen. Die Lage der Dämpfungsdrahtbohrung ist an der mit 28 ausgewiesenen Stelle durch die Unstetigkeit im Verlauf der Kurven 29, 30 erkennbar. Die Linienzüge 31 bzw. 32 stellen den radialen Verlauf der aus den fliehkraftbedingten Zugspannungen, Biegespannungen und Torsionsspannungen gebildeten Vergleichsspannungen dar. Bei 33 ist der radiale Verlauf der Zeitstandfestigkeit  $\sigma_{B 10^{4h}}$  des Schaufelwerkstoffes aufgetragen; bei 34  $\sigma_{B 10^{2h}}$ .

Die in der Bohrungszone durch Kerbwirkung auftretende Spannungsspitze (in Figur 7 durch Pfeile angedeutet) wird beim Kriechen des Werkstoffes zwar langsam abgebaut, aber dieser Vorgang ist mit einem frühzeitigen Einreißen verbunden, weil die betroffenen Fasern

nach Erreichen ihrer gegenüber dem übrigen Querschnitt verringerten Lebensdauer spröde brechen. Eine konventionell verwundene Laufschaufel ist demnach in der Bohrungszone äußerst bruchgefährdet, zumal an dieser Stelle immer mit gewissen Resonanzspannungsamplituden gerechnet werden muß. Wie die Lage der Spannungsspitzen am Bohrrand (Pfeile in Figur 7) zu den den radialen Verlauf der Zeitstandfestigkeiten darstellenden Kurven 33 und 34 erkennen läßt, bringt die Anwendung der Erfindung eine beträchtliche Erhöhung der Lebensdauer.

Auch hier läßt der in Figur 8 bei 35 bzw. 36 dargestellte radiale Verlauf der Abströmwinkel deutlich erkennen, daß bei Anwendung der Erfindung eine Abweichung dieser unter strömungstechnischen Gesichtspunkten wichtigen Kenngröße nicht herbeigeführt werden muß. Diese Abweichung beschränkt sich auch hier auf den bei 37 bzw. 38 dargestellten Verlauf der Staffelungswinkel  $\beta_s$ , durch den hervortritt, daß im unteren Bereich des Laufschaufelblattes die Verwindung erhöht, im Kopfbereich, also im Bereich der Dämpfungsdrahtbohrung, hingegen stark vermindert ist.

Bei Anwendung der Erfindung läßt sich im Rahmen des fachmännischen Handelns jeweils ein solcher radialer Verlauf der Verwindung und der Profilwölbung ermitteln, bei dem einerseits im radialen Bereich minimaler Bruchsicherheit eine stark erhöhte und ausreichende Sicherheitsreserve erzielt wird, ohne daß dadurch in den angrenzenden Bereichen die Bruchsicherheit zu stark herabgesetzt wird. Wesentliche Einflüsse auf die strömungstechnische Charakteristik einer solchen Laufschaufel sind insbesondere bei Beibehaltung des radialen Verlaufs der Abströmwinkel nicht zu befürchten.

2144600

- 12 -

A n s p r ü c h e

1.

Verwundene Laufschaufel für axial durchströmte Turbomaschinen mit zum Kopfprofil hin kontinuierlich abnehmenden Querschnittsflächen, dadurch gekennzeichnet, daß im radialen Bereich minimaler Bruchsicherheit eine gegenüber den angrenzenden radialen Bereichen verminderte Verwindung und verminderte Änderung der Profilwölbung vorgesehen ist.

2.

Laufschaufel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der strömungstechnisch optimale Verlauf (26, 36) der abströmseitigen Profilskelettwinkel über die ganze Schaufelhöhe im wesentlichen beibehalten ist.

3.

Laufschaufel nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die bereichsweise verminderte Verwindung durch eine entsprechend erhöhte Verwindung in den radial angrenzenden Bereichen im wesentlichen kompensiert ist.

309811/0450

-A-

Fig. 1

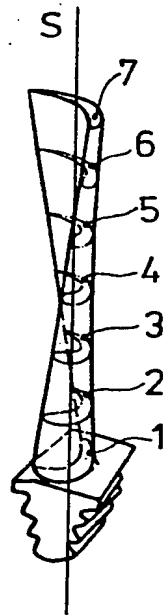


Fig. 3

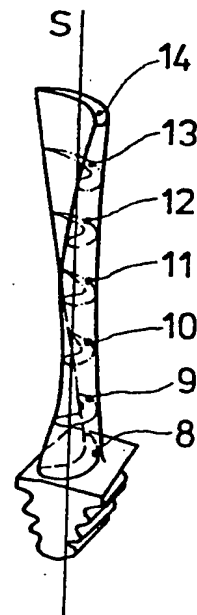


Fig. 2

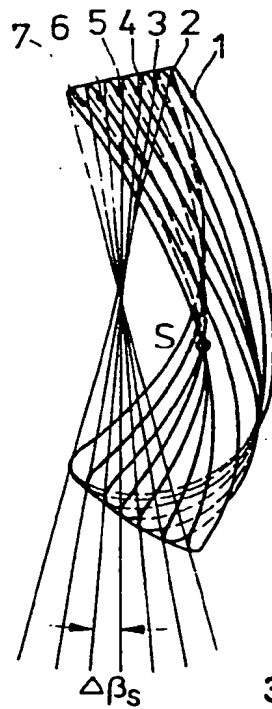
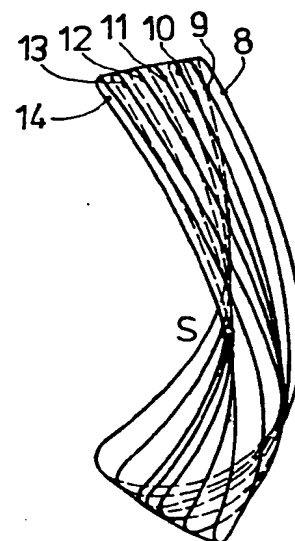


Fig. 4



309811/0450

Fig. 5

-14-

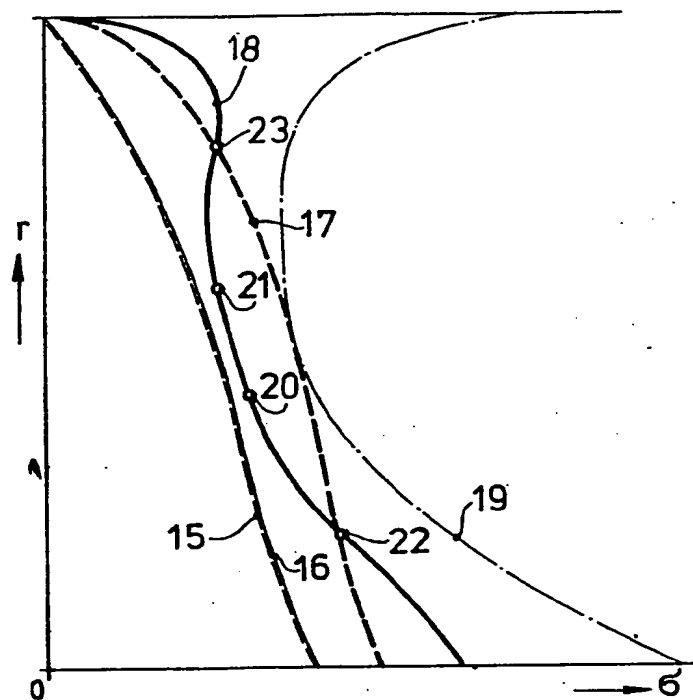


Fig. 6

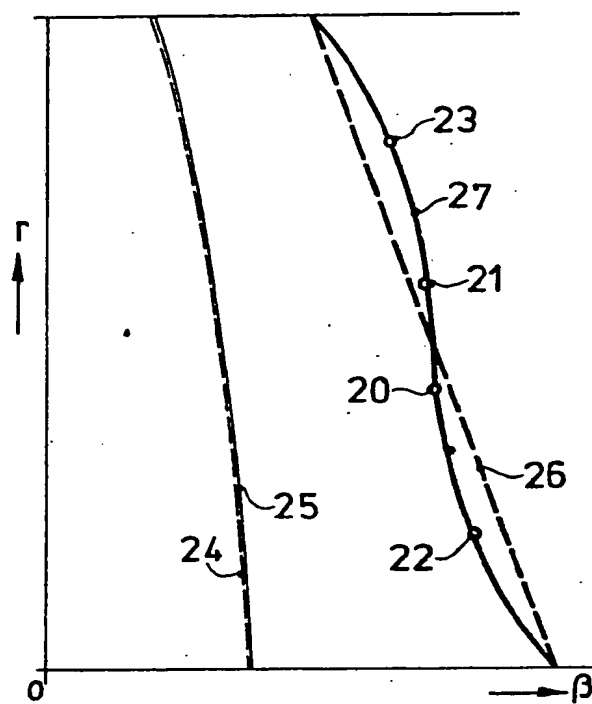


Fig. 7

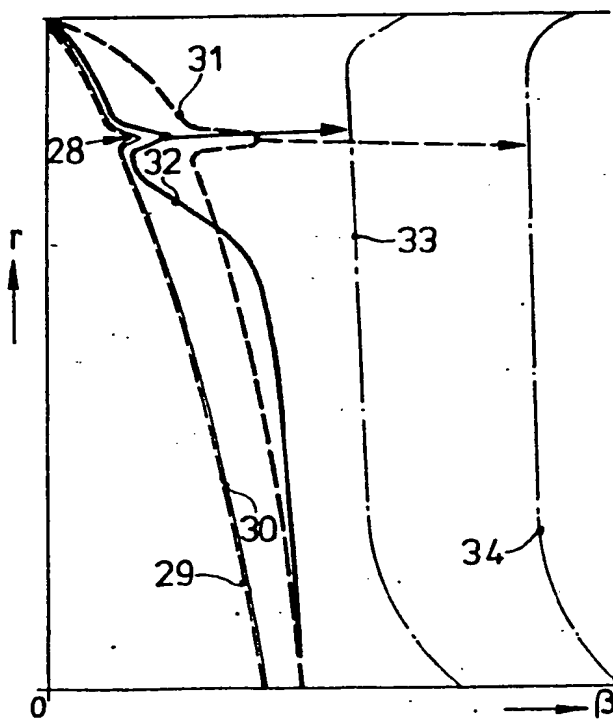


Fig. 8

